

## УСТОЙЧИВОСТЬ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ МОРСКИХ СУДОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАСТРОЕК РЕГУЛЯТОРОВ ЧАСТОТЫ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ

В статье рассматривается вопрос обеспечения устойчивой работы судовых электротехнических комплексов. При проведении исследований используются реальные осциллограммы обменных и синфазных колебаний мощности, снятые при совместно-параллельной работе дизель-генераторных агрегатов на общие шины главного распределительного щита. Результаты математического моделирования позволяют сделать вывод о необходимости ограничения изменения значений коэффициентов усиления частотных регуляторов. Предложено ограничить изменение коэффициентов усиления частотных регуляторов при устранении обменных колебаний мощности.

**Ключевые слова:** обменные колебания мощности, параллельная работа, автономный электротехнический комплекс, устойчивость, генераторный агрегат, настройки регулятора частоты.

**Введение.** Флот Российской Федерации имеет в своем составе сотни морских судов, выполняющих различные функции [1]. К основным задачам морских плавучих объектов относятся транспортировка грузов и людей, добыча рыбных ресурсов и углеводородов, укладка трубопроводов и коммуникаций, защита государства, обеспечение работы в арктических условиях и другие [2, 3]. На борту любого морского судна имеется автономный электротехнический комплекс, состоящий из генерирующих и потребляющих электроэнергию устройств и механизмов [4]. Условия и особенности эксплуатации электротехнических комплексов морских судов регламентируются требованиями Морского регистра судоходства и Международной морской конвенцией о сохранности человеческой жизни на море СОЛАС [5, 6]. В качестве источников электроэнергии чаще всего используются совместно-параллельно включенные дизель-генераторные агрегаты на главный распределительный щит [7, 8]. Перечень мощностей и номенклатуры потребителей очень широк и определяется типом и назначением судна [9]. Поддержание устойчивой работы электростанции морского судна с выработкой качественной электроэнергии является жизненно важным условием сохранности морского судна и выполнения им своих технологических и производственных задач [10].

**Постановка задачи.** На морских судах применяется наиболее рациональная с технической и экономической стороны схема производства электрической энергии с параллельной работой нескольких дизель-генераторных агрегатов [11]. Каждый дизель-генератор имеет свой регулятор частоты вра-

щения и регулятор напряжения [12]. Настройки регуляторов определяют распределение нагрузки между агрегатами. В квазиустановившихся режимах эксплуатации электрических силовых комплексов морских судов возникают обменные и синфазные колебания мощности между совместно-параллельно включенными генераторами [11]. Так, например, на морском пароме «Ейск» смонтированы три главных дизеля 6VD26/20-AL-2 с генераторами S450MG 800кВА (рис. 1), зафиксированы обменные (рис. 2) и синфазные (рис. 3) колебания мощности.

Для устранения таких колебаний необходимо осуществлять воздействие на регуляторы частоты вращения и изменять их коэффициенты передачи так, чтобы не нарушалась устойчивая работа электротехнического комплекса судна. Необходимо определить допустимый диапазон изменения коэффициентов усиления частотных регуляторов совместно-параллельно включенных генераторов для сохранения устойчивой работы электростанций морских судов.

**Теория.** Одной из проблем электротехнических комплексов морских судов по праву считается появление обменных и синфазных колебаний мощности при совместно-параллельном включении дизель-генераторных агрегатов [11]. Такие колебания приводят к ускоренному использованию ресурса частотных регуляторов вращения дизелей, невозможности использования генерирующих устройств на полную мощность, к пульсирующей форме напряжения в электрической сети судна, снижению характеристики полезного действия электрических приводов и систем судовой автоматики, а также не-

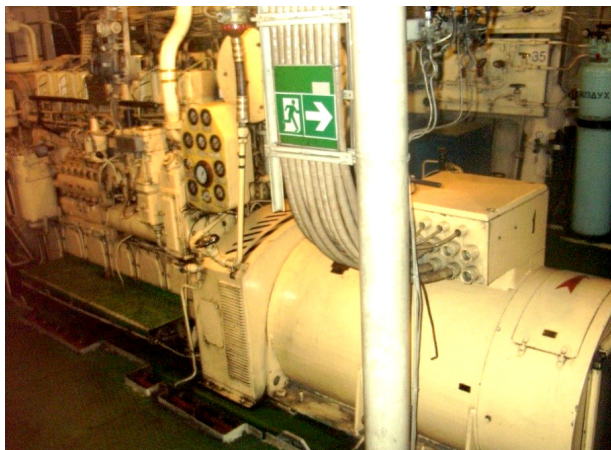


Рис. 1. Дизель-генератор на пароме «Ейск»

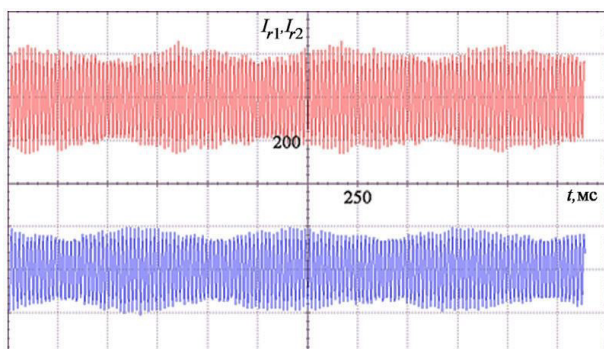


Рис. 2. Токи совместно-параллельно включенных генераторов в квазиустановившемся режиме (обменные колебания мощности)

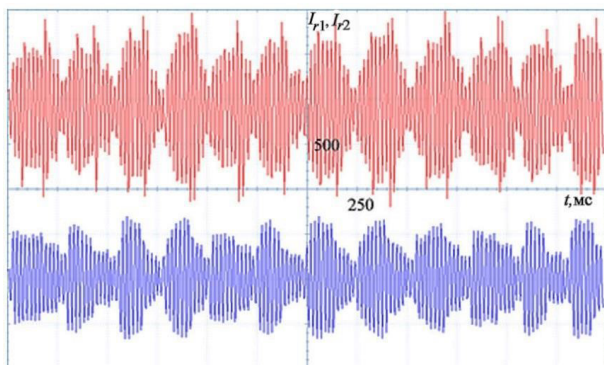


Рис. 3. Токи совместно-параллельно включенных генераторов при работе гребных электродвигателей (синфазные колебания мощности)

гательно сказываются на устойчивости работы всего электротехнического комплекса судна, вплоть до его обесточивания. Очевидно, что нарушение электроснабжения автономного морского объекта может привести к аварийной ситуации и поставить под угрозу безопасность судна и его экипажа.

Для уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности доказана эффективность ступенчатого уменьшения коэффициентов усиления частотных регуляторов вращения дизелей, а для устранения синфазных колебаний мощности необходимо избегать значительного различия этих коэффициентов у параллельно работающих агрегатов [11, 13]. До установки блока устранения обменных колебаний мощности на судно и ввода его в работу

необходимо воспользоваться математическим моделированием и оценить допустимые границы и соотношения при изменении коэффициентов усиления частотных регуляторов [14].

Синхронные генераторы представляются уравнениями Парка–Горева в неподвижных относительно ротора  $d$  и  $q$  координатах:

$$\frac{d\psi_{sd}}{d\tau} = \psi_{sq}\omega_r - r_s i_{sd} - u_{sd}, \quad (1)$$

$$\frac{d\psi_{sq}}{d\tau} = -\psi_{sd}\omega_r - r_s i_{sq} - u_{sq}, \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_f}{d\tau} = u_f - r_f i_f, \quad (3)$$

где  $\psi_{sd}$ ,  $u_{sd}$ ,  $i_{sd}$  — проекции векторов потокосцепления, напряжения и тока статора на ось  $d$ ;

$\psi_{sq}$ ,  $u_{sq}$ ,  $i_{sq}$  — проекции векторов потокосцепления, напряжения и тока статора на ось  $q$ ;

$r_s$  — сопротивление обмотки статора генератора;

$\psi_f$  — потокосцепление генераторной обмотки возбуждения;

$i_f$  — ток генераторной обмотки возбуждения;

$u_f$  — напряжение генераторной обмотки возбуждения;

$r_f$  — сопротивление генераторной обмотки возбуждения;

$\tau$  — время процесса.

$$\psi_{sd} = (L_d + L_{sd})i_{sd} + L_d i_f, \quad (4)$$

$$\psi_{sq} = (L_q + L_{sq})i_{sq}, \quad (5)$$

$$\psi_f = L_d i_{sd} + L_f i_f, \quad (6)$$

где  $L_{sd}$ ,  $L_d$  — индуктивности рассеяния статорной обмотки и обмотки главного контура намагничивания по оси  $d$ ;

$L_{sq}$ ,  $L_q$  — индуктивности главного контура и обмотки намагничивания по оси  $q$ ;

$L_f$  — индуктивность генераторной обмотки возбуждения.

Синхронный генератор имеет бесщеточный возбудитель с пропорциональным регулятором напряжения:

$$\frac{du_f}{dt} = [-u_f + K_f(U_0 - u_m)]/T_B, \quad (7)$$

где  $K_f$  — коэффициент усиления,

$$u_m = \sqrt{u_{sd}^2 + u_{sq}^2},$$

$U_0$  — заданное значение напряжения.

Дизель опишем уравнением:

$$J_m \frac{d\omega_r}{d\tau} = M_d - M_g, \quad (8)$$

$$M_d = K_m h, \quad (9)$$

$$M_g = \psi_{sq} i_{sd} - \psi_{sd} i_{sq}, \quad (10)$$

где  $J_m$  — приведенный момент инерции валов дизель-генератора,

$M_d$  — момент дизеля,

$M_g$  — момент генератора,

$h$  — перемещение топливной рейки,

$K_m$  — коэффициент усиления дизеля по частоте вращения.

Частотный регулятор дизеля:

$$T_{\omega} \frac{dh}{dt} = K_{\omega} U_{\varepsilon} - h, \quad (11)$$

где  $T_{\omega}$  — постоянная времени,  
 $K_{\omega}$  — коэффициент усиления,  
 $U_{\varepsilon}$  — разность между заданной  $\omega_{r0}$  и действительной  $\omega_r$  частотами вращения.

**Результаты экспериментов.** На рис. 4 представлены результаты исследования математическими методами в виде графиков токов и частот вращения двух совместно-параллельно включенных на шины главного распределительного щита генераторов при значениях коэффициентов передачи их регуляторов частоты вращения  $K_{\omega 1} = 80$ ,  $K_{\omega 2} = 40$ . На графиках токов видны синфазные колебания мощности с увеличивающейся амплитудой, частоты вращения генераторов при этом стремятся к установившемуся значению. Результаты математического моделирования на рис. 4 аналогичны осциллограммам токов генераторов на пароме «Ейск», представленным на рис. 3.

На рис. 5 представлены результаты математического регулирования в виде графиков токов и частот вращения двух совместно-параллельно включенных на шины главного распределительного щита генераторов при значениях коэффициентов усиления их частотных регуляторов  $K_{\omega 1} = 350$ ,  $K_{\omega 2} = 250$ . Очевидно наличие синфазных колебаний токов, а значит, и мощностей с нарастающей амплитудой, мгновенные частоты вращения генераторов при этом также растут, что свидетельствует о потере устойчивости в работе судовой электростанции, и приближающемся срабатывании защиты с последующим обесточиванием судна.

**Обсуждение экспериментов.** Таким образом, изменение коэффициентов усиления частотных регуляторов при совместно-параллельном включении на шины главного распределительного щита дизель-генераторов может привести к возникновению неконтролируемого роста амплитуды синфазных колебаний мощности и частоты вращения. Для обеспечения сохранения устойчивой работы судовой электростанции при изменении коэффициентов усиления частоты проведено математическое моделирование при различных соотношениях значений коэффициентов передачи. Результаты исследу-

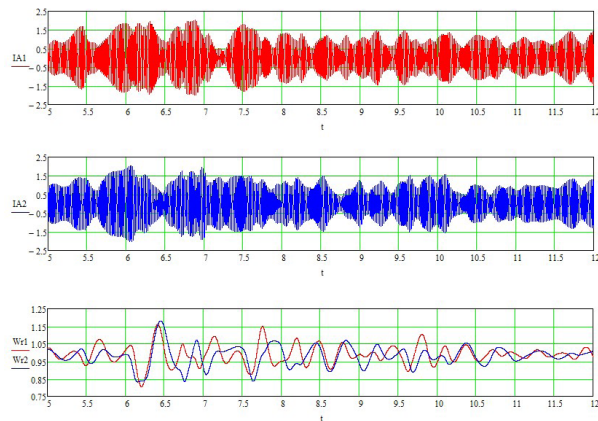


Рис. 4. Результаты исследования совместно-параллельной работы генераторов при  $K_{\omega 1} = 80$ ,  $K_{\omega 2} = 40$

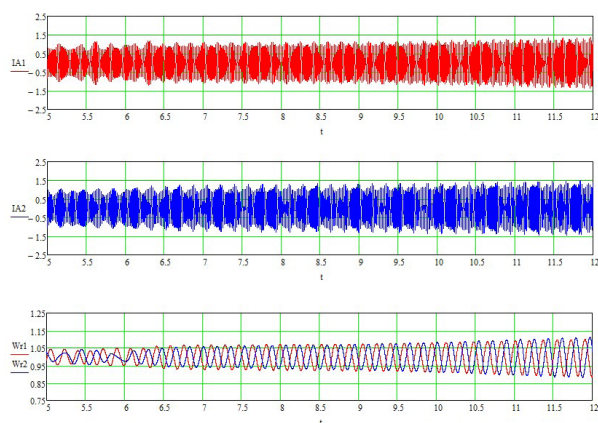


Рис. 5. Результаты исследования совместно-параллельной работы генераторов при  $K_{\omega 1} = 350$ ,  $K_{\omega 2} = 250$

ований, при которых сохраняется устойчивая работа судовой электростанции, приведены в табл. 1, а также построена карта настроек на рис. 6.

Видно, что при равенстве коэффициентов передачи регуляторов частоты дизель-генераторов синфазные колебания отсутствуют. Отличие коэффициентов передачи приводит к появлению синфазных колебаний, причем их амплитуда увеличивается с увеличением разницы между значе-

Таблица 1

Исследование зависимости амплитуды синфазных колебаний мощности дизель-генератора от значений коэффициента усиления частотного регулятора в устойчивых режимах

$K_{\omega 1} / K_{\omega 2}$	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
10	0,01	1,2	1	0,9	0,9	1,2	0,5	0,45	0,4	0,3	0,3
20	1	0,01	0,9	1	1	1	1,1	0,95	0,8	0,75	0,9
40	0,8	0,65	0,05	1	1,1	0,9	1,2	1,2	1,35	1	1,2
60	1,1	0,95	0,95	0,05	0,3	0,9	0,7	0,95	0,95	1,05	1,1
80	1	1	0,8	0,25	0,05	0,25	0,7	1,1	0,9	1	1,3
100	0,6	0,7	1,1	1,1	0,2	0,05	0,22	0,8	0,8	0,6	1,1
120	0,4	1	1,2	1	1,1	0,1	0,06	0,17	1,1	0,8	1,2
140	0,6	1,1	1,2	0,9	0,95	0,22	0,08	0,06	0,17	0,7	1,05
160	1,2	1	1,2	0,7	0,8	0,6	0,25	0,09	0,06	0,17	0,6
180	1,1	1,2	1,05	1,1	1,2	0,75	0,7	0,2	0,07	0,06	0,14
200	1	1,05	0,95	1,05	1,05	0,75	0,7	0,6	0,15	0,06	0,07

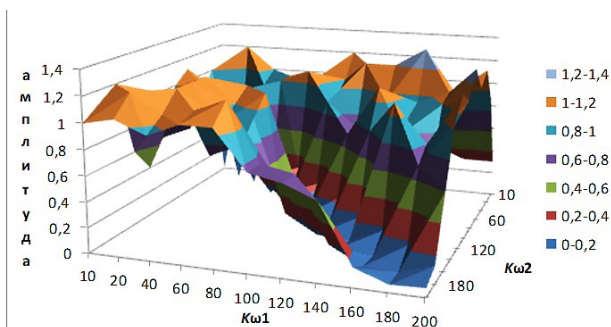


Рис. 6. Карта зависимости значений амплитуды синфазных колебаний мощности от значений коэффициентов усиления частотных регуляторов

ниями коэффициентов передачи. При изменениях коэффициентов передачи в диапазоне от 0 до 200, как, например, на рис. 4, параллельно включенные дизель-генераторы работают устойчиво. При превышении коэффициентами передачи значений наблюдаются синфазные колебания, как, например, на рис. 5, то есть параллельная работа генераторов становится неустойчивой. Данные, приведенные выше, получены для электротехнических комплексов морских судов. Однако они могут быть применены в любой автономной электротехнической системе, в которой используется встречно-параллельное включение дизель-генераторных агрегатов. Конечно, условия работы морского судна являются полностью автономными, что делает работу его электротехнического комплекса исключительно важной, но и в наземных системах могут возникать экстремальные ситуации, при которых жизнедеятельность полностью зависит от электрообеспечения.

**Заключение.** Исследования продемонстрировали зависимость устойчивости работы судового электротехнического комплекса с встречно-параллельным включением на шины главного распределительного щита дизель-генераторных агрегатов от значений и соотношения коэффициентов усиления частотных регуляторов. На основе результатов математического моделирования можно рекомендовать ограничить изменение коэффициентов усиления частотных регуляторов при параллельной работе в диапазоне 0–200. Такое ограничение необходимо учитывать при изменении коэффициентов усиления частотных регуляторов для устранения обменных колебаний мощности.

#### Библиографический список

1. Хватов О. С., Тарпанов И. А., Кузнецов П. В. Судовая электроэнергетическая система с обратимой валогенераторной установкой по схеме машины двойного питания и дизель-генератором переменной частоты вращения // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2021. № 3. С. 93–100. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-93-100.
2. Dar'envov A. B., Samoyavchev I., Khvatov O. S. [et al.]. Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 108. 14002. DOI: 10.1051/mateconf/201710814002.
3. Sen'kov A. P., Dmitriev B. F., Kalmykov A. N. [et al.]. Ship unified electric-power systems // Russian Electrical Engineering. 2017. Vol. 88 (5). P. 253–258. DOI: 10.3103/S1068371217050108.
4. Губанов Ю. А., Калинин И. М., Корнев А. С. [и др.]. Направления совершенствования судовых единых электроэнергетических систем // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 1-1 (43). С. 103–109.

5. Sipeng Z., Ma Z., Zhang K. [et al.]. Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions // Energy. 2020. Vol. 210. 118558. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118558.
6. Sipeng Z., Ma Z., Deng K. A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles // Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 120. 109611. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109611.
7. Geertsma R. D., Visser K., Negenborn R. R. Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion // Applied Energy. 2018. Vol. 228. P. 2490–2509. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.080.
8. Mondejar M. E., Andreasen J. G., Pierobon L. [et al.]. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications // Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 91. P. 126–151. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.074.
9. Грачева Е. И., Ильясов И. И., Алимова А. Н. Сравнительный анализ и исследование методов расчета потерь электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Vol. 20, № 3-4. P. 62–71. EDN: XWBLS P.
10. Ившин И. В., Низамиев М. Ф., Владимиров О. В. [и др.]. Измерительно-диагностический комплекс для диагностики энергетических установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 3-4. С. 109–114.
11. Савенко А. Е., Голубев А. Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах. Иваново, 2016. 172 с. ISBN 978-5-00062-196-7.
12. Савенко А. Е., Савенко П. С. Влияние люфта на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20 № 5-6. С. 46–54. EDN: UWONEI.
13. Savenko A. E., Savenko P. S. Analysis of Power Oscillations Parameters in Autonomous Electrical Complexes Using the Method of Customization Charts Designing // Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020. 2020. P. 400–405.
14. Алейников А. В., Голубев А. Н., Мартынов В. А. Разработка уточненной математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами для расчетов в реальном времени // Вестник ИГЭУ. 2017. №. 5. С. 37–43.

**САВЕНКО Александр Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрооборудование судов и автоматизация производства» Керченского государственного морского технологического университета (КГМТУ), г. Керчь. SPIN-код: 4120-4999  
 AuthorID (РИНЦ): 879584  
 ORCID: 0000-0002-1817-8208  
 AuthorID (SCOPUS): 57211745303  
 Адрес для переписки: savenko-70@mail.ru  
**САВЕНКО Павел Станиславович**, аспирант кафедры «Электрооборудование судов и автоматизация производства» КГМТУ, г. Керчь. SPIN-код: 2188-9658  
 AuthorID (РИНЦ): 1144532  
 Адрес для переписки: savenko-70@mail.ru

#### Для цитирования

Савенко А. Е., Савенко П. С. Устойчивость работы электротехнических комплексов морских судов при изменении настроек регуляторов частоты дизель-генераторов // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 76–79. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-76-79.

Статья поступила в редакцию 29.11.2022 г.  
 © А. Е. Савенко, П. С. Савенко